



Visualisasi Data Elemen Jejak Granitik untuk Analisis Tataan Tektonik Menggunakan Aplikasi Berbasis Web

Granitic Trace Elements Data Visualization for Tectonic Setting Analysis Using Web Base Application

Herru Sendia Febian dan Khaidir Ismed

Balai Pendidikan dan Pelatihan Tambang Bawah Tanah, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral,
 Jalan Soekarno-Hatta, Kota Sawahlunto, Sumatera Barat
 Email: herru.febian@esdm.go.id

Submit: 18 October 2024, Revised: 18 November 2025, Approved: 24 November 2025, Online: 27 November 2025
 DOI: 10.33332/jgsm.geologi.v26i4.935

Abstrak- Komposisi elemen jejak dari batuan granitik dapat digunakan untuk mengetahui evolusi tektonik batuan. Salah satunya adalah dengan menggunakan unsur Rb, Y, Nb, dan Ta seperti yang dilakukan oleh Pearce dkk. (1984) menggunakan diagram Rb vs (Y+Nb) dan Rb vs (Yb+Ta). Untuk menghasilkan *plotting* nilai elemen jejak pada diagram diskriminasi, peneliti geokimia menggunakan perangkat lunak *desktop* (contoh: GCDKit, PetroGraph, GeopyTool, dll.). Namun demikian, *software* tersebut menghasilkan diagram statis yang memiliki banyak kelemahan fleksibilitas diantaranya yaitu tidak dapat membandingkan beberapa data secara langsung, tidak dapat mengelompokkan data secara langsung dan penggunaan diagram *scatter plot* yang terbatas. Perangkat lunak geokimia semestinya dapat memberikan keleluasaan bagi ahli geokimia untuk dapat secara fleksibel mengatur visualisasi data sehingga hasil interpretasi yang dihasilkan juga tidak terbatas pada satu visualisasi data saja. Aplikasi berbasis web yang dibangun dengan Node.js, MySQL dan D3.js dapat menampilkan visualisasi diagram Pearce dkk. yang lebih interaktif dan lebih dinamis dengan menggunakan *contour density* selain penggunaan titik-titik plot. Visualisasi data yang lebih fleksibel pada aplikasi berbasis web dapat membantu ahli geokimia dalam menentukan *outlier* data, korelasi antar data dan evolusi geokimia dari arah sebaran data yang terlihat lebih jelas.

Abstract- The trace element composition of granitic rocks can be used to determine the tectonic evolution of those rocks. One method involves using the elements Rb, Y, Nb, and Ta, as demonstrated by Pearce et al. (1984) using Rb vs. (Y+Nb) and Rb vs. (Yb+Ta) diagrams. To plot trace element values on discrimination diagrams, geochemical researchers typically use desktop software (e.g., GCDKit, PetroGraph, GeopyTool, etc.). However, these softwares produce static diagrams with several flexibility limitations, such as the inability to compare multiple datasets directly, the inability to group data on the fly, and the restricted use of scatter plots. Geochemical software should ideally provide geochemists with the freedom to flexibly manage data visualization so that interpretations are not limited to a single view. A web-based application built with Node.js, MySQL, and D3.js can display Pearce et al. diagrams that are more interactive and dynamic, utilizing contour density alongside traditional scatter plots. More flexible data visualization in a web application can assist geochemists in identifying data outliers, correlations, and geochemical evolution through more clearly visible data distribution trends.

Keywords: granite, geochemical data analysis, tectonic discrimination diagram, web application.

Kata Kunci: granit, analisis data geokimia, diagram diskriminasi tektonik, aplikasi web.

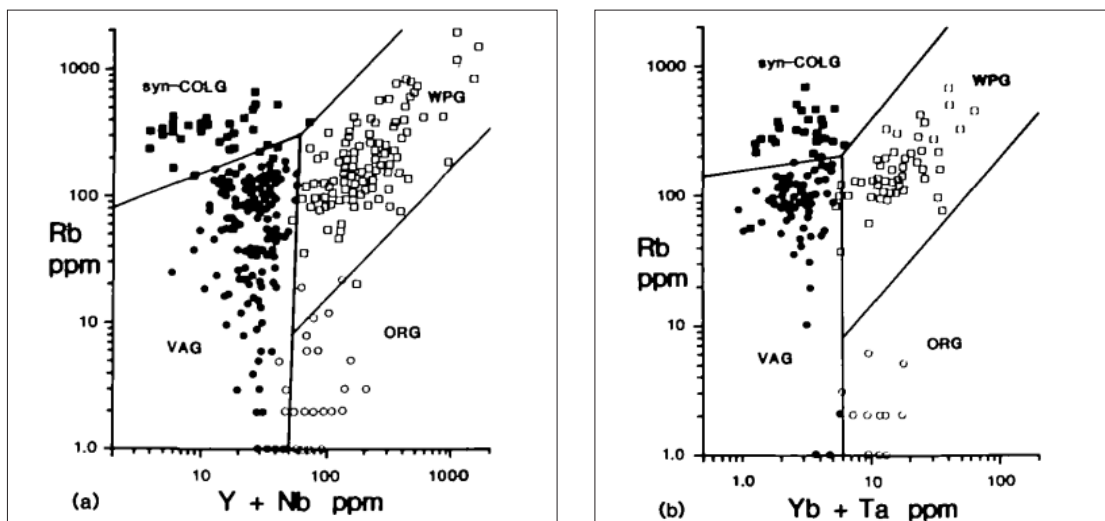
PENDAHULUAN

Salah satu klasifikasi batuan granitik adalah dengan berdasarkan tatanan tektonik pembentukannya. Sumber magma dan tatanan tektonik batuan beku berkaitan satu sama lain sehingga komposisi kimia batuan dapat dikaitkan dengan tatanan tektoniknya. Beberapa elemen jejak yang bersifat *immobile* pada proses alterasi seperti *zirconium*, *yttrium*, *niobium* dan beberapa unsur tanah jarang berat telah digunakan sebagai alat diskriminasi untuk tatanan tektonik batuan (Pitcher, 1997), salah satunya adalah diagram diskriminasi yang dikemukakan oleh Pearce dkk. (1984).

Pearce dkk. (1984) membagi tatanan tektonik batuan granitik menjadi empat bagian yaitu: *Ocean Ridge Granite* (ORG), *Volcanic Arc Granite* (VAG), *Within Plate Granite* (WPG), dan *Collision Granit* (COLG) dengan menggunakan korelasi unsur jejak *Rubidium* (Rb) dengan *Yttrium* (Y) dan *Niobium* (Nb) dan dengan *Iterbium* (Yb) dan *Tantalum* (Ta) dalam diagram Rb-(Y+Nb) dan Rb-(Yb+Ta). Diagram Pearce (1984) membagi tatanan tektonik menggunakan garis-garis batas (Tabel 1) yang telah ditentukan koordinatnya

berdasarkan hasil plot (Gambar 1).

Meskipun diagram Pearce dkk. (1984) telah banyak digunakan oleh ahli geokimia namun pada beberapa kasus hasil plot unsur jejak batuan tidak sepenuhnya menggambarkan tatanan tektonik asalnya. Masalah utamanya adalah komposisi kimia batuan granitik pada dasarnya bergantung kepada sifat dasar batuan asalnya dan hal ini hanya dikontrol oleh tatanan tektonik pada kasus-kasus yang tidak kompleks (Foster dkk., 1997). Sebagai contoh dari hasil evaluasi yang dilakukan oleh Foster dkk. (1997) terhadap penggunaan diagram diskriminasi Pearce dkk. (1984), batuan yang berasal dari tatanan tektonik *Supra Subduction Zone Ridge* (SSZ) yang merupakan salah satu tipe dari *Ocean Ridge*, diplot pada area VAG. Hal ini karena adanya kontaminasi dari material kontinen pada batuan yang berasal dari zona yang berkaitan dengan subduksi. Contoh lainnya, untuk batuan yang berasal dari tatanan *Continental Collision*, data elemen jejaknya dapat diplot berada pada area VAG yang disebabkan oleh adanya pengaruh dari sumber batuan asal yang kurang matang dan level fraksinasi yang rendah. Foster dkk. (1997) telah menjabarkan ketidaksesuaian tersebut seperti pada Tabel 2.



Sumber: Pearce dkk. (1984)

Gambar 1. Diagram diskriminasi tektonik Pearce dkk. (1984).

Sampai pada saat ini para peneliti geokimia pada batuan beku telah menggunakan beberapa perangkat lunak untuk menampilkan visualisasi dari data geokimia batuan (Tabel 2). Seluruh perangkat lunak tersebut bekerja secara *offline* pada komputer pengguna dan

menampilkan visualisasi data dalam bentuk grafik statis yang tidak dapat dimodifikasi secara langsung agar dapat dianalisis secara lebih fleksibel. Aplikasi desktop memiliki beberapa kelemahan yaitu: 1) aplikasi harus terinstal pada komputer pengguna

sehingga performa dan kapasitas aplikasi tergantung pada spesifikasi komputer, dan 2) akses terbatas pada

satu komputer sehingga menyulitkan untuk melakukan analisis data secara kolektif.

Tabel 1. Kompilasi tipe batuan magmatik dan tatanan tektonik yang dapat diplot pada beragam area dikriminasi pada diagram Rb vs (Y+Nb) Pearce dkk. (1984) (Foster dkk., 1997).

	ORG	VAG	WPG	COLG
<i>Commonly</i>	<i>Subduction-unrelated ocean ridge</i>	<i>Immature and mature oceanic island arc; transitional arcs; continental arcs; continental back-arc basins</i>	<i>Oceanic intra-plate; continental intra-plate; oceanic back-arc basins; post collision</i>	<i>Syn-collision; post collision</i>
<i>Occasionally</i>	<i>Ocean back-arc basin ridge</i>	<i>Oceanic back-arc basin ridge; arc-continent collision; continental rift closely postdating subduction; syn-collision; post-collision</i>	<i>Evolve rocks from continental margins; terminal stage of continental arc magmatism</i>	<i>Continental intra-plate derived from or contaminated by continental crust</i>
<i>Rarely</i>	<i>Supra-subduction zone ridges (SSZ)</i>	<i>Supra-subduction zone ridges</i>	<i>Ocean back-arc basin ridges; differentiated SSZ; arc-continent collision</i>	<i>Continental back-arc basins on thick crust; continental margin with pelitic source</i>

Keterangan: ORG: *Ocean Ridge Granite*, VAG: *Volcanic Arc Granite*, WPG: *Within Plate Granite*, dan COLG: *Collision Granite*.

Masalah lainnya adalah pada penggunaan visualisasi data statis pada diagram Pearce dkk. (1984) adalah hasil plot data yang biasanya diproses secara otomatis oleh aplikasi desktop yang digunakan, tidak secara mutlak menunjukkan tatanan tektonik yang benar. Tanpa dukungan data geokimia lainnya, peneliti yang menggunakan diagram Pearce dkk. (1984) statis dapat melakukan kesalahan dalam interpretasi hasil plot. Hal ini mungkin bisa dihindari dengan melakukan analisis komparatif dengan beberapa data elemen jejak dengan hasil plot serupa dan telah diketahui karakteristik tatanan tektoniknya dari metode-metode analisis lain. Untuk menghasilkan suatu diagram yang dapat secara dinamis membandingkan beberapa data elemen jejak pada satu diagram, maka diperlukan perangkat/aplikasi yang dapat menyimpan data dalam jumlah besar, dapat diakses oleh banyak pengguna, dan dapat menampilkan visualisasi data secara dinamis.

Aplikasi berbasis web merupakan salah satu solusi yang telah banyak digunakan. Aplikasi berbasis web

dijalankan pada satu komputer server yang dapat diakses oleh beberapa pengguna dari perangkat masing-masing melalui *web browser* (peramban web). Aplikasi web dapat dihubungkan dengan *database* untuk menyimpan data dengan jumlah yang besar. Aplikasi web dapat dibangun menggunakan beberapa pilihan bahasa pemrograman, salah satunya adalah dengan menggunakan Node.js yang berbasis JavaScript.

JavaScript adalah salah satu bahasa pemrograman yang biasa digunakan untuk membuat halaman web yang interaktif pada *web browser* namun juga dapat bekerja pada lingkungan di luar *web browser* seperti Node.js yang digunakan pada server. Node.js dapat digunakan untuk membuat aplikasi web yang dapat dikembangkan menggunakan JavaScript mulai dari sisi server sampai pada halaman web sehingga lebih mudah untuk dikembangkan. Pengembangan aplikasi web menggunakan Node.js dapat dilakukan dengan menggunakan *web framework* sehingga

pengembangan aplikasi dapat lebih cepat dan efisien. Dalam penelitian ini digunakan *framework* Express.js, sedangkan untuk menampilkan visualisasi data pada halaman web digunakan D3.js.

D3.js adalah suatu *library* untuk JavaScript yang digunakan untuk visualisasi data. Dalam menampilkan visualisasi data D3.js menggunakan standar visualisasi yang digunakan pada lingkungan web seperti SVG dan

Canvas. D3.js dapat digunakan untuk menampilkan visualisasi data yang menarik dan secara dinamis dapat melakukan operasi *entering*, *updating* dan *exiting* elemen yang cocok untuk digunakan untuk menghasilkan diagram dinamis. Untuk menyimpan data pada aplikasi web dengan Node.js dapat digunakan beberapa pilihan *database*, dalam penelitian ini digunakan *database* MySQL yang dapat menyimpan data ke dalam skema dan tabel.

Tabel 2. Contoh perangkat lunak yang digunakan untuk analisis geokimia yang telah ada.

Nama Perangkat Lunak	Pencipta	Bahasa	Desktop atau Web
Geopytool	Yu dkk. (2018)	Python	Desktop
CGDK	Qiu dkk. (2013)	VBA	Desktop
GeoKit	Lu (2004)	VBA	Desktop
GCDPlot	Wang dkk. (2008)	VBA	Desktop
GeoPLot	Zhou dan Li (2006)	VBA	Desktop
PetroGraph	Petrelli dkk. (2005)	MS Visual Basic	Desktop
GCDKit	Janousek dkk. (2003)	R	Desktop
PetroPlot	Su dkk. (2003)	VBA	Desktop

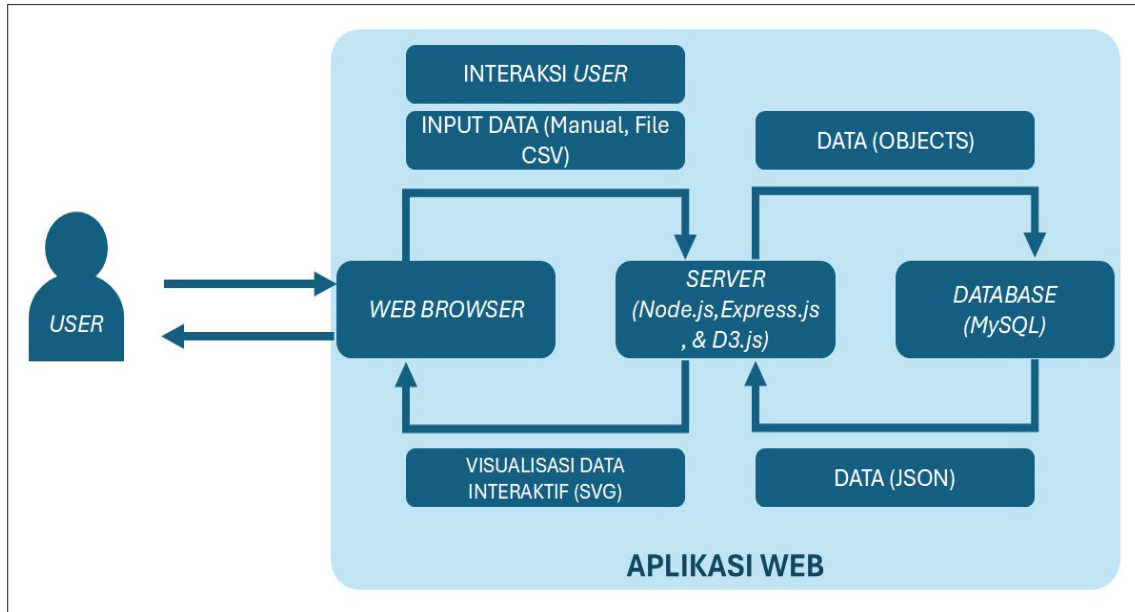
METODE

Penelitian ini dilakukan untuk menguji dan mengevaluasi penggunaan aplikasi berbasis web yang dibangun dengan JavaScript dalam menampilkan visualisasi dan analisis data geokimia elemen jejak pada diagram diskriminasi tektonik Pearce dkk. (1984). Penulis menggunakan diagram $Rb - (Y+Nb)$ dan $Rb - (Yb+Ta)$ untuk menampilkan data elemen jejak batuan granitik dari beberapa lokasi yang telah dipilih (Tabel 3).

Aplikasi web ini dibangun menggunakan Node.js sebagai *runtime environment* pada sisi server yang disusun dalam Express.js sebagai *framework*. Aplikasi web ini menggunakan MySQL untuk mengelola data-data elemen jejak ke dalam skema dan tabel di dalam *database*. Sedangkan data yang sudah dimasukkan

ke dalam *database* divisualisasikan ke dalam diagram pada halaman web menggunakan D3.js yang merupakan *library* dari JavaScript yg dibuat khusus untuk menampilkan visualisasi data ke dalam *tag* svg (Gambar 2). Diagram ditampilkan pada svg dalam bentuk xy-diagram dengan garis batas diskriminasi rezim tektonik yang telah ditentukan (Tabel 4).

Aplikasi web ini kemudian diuji penggunaannya dengan memasukkan data-data elemen jejak yang telah dipilih ke dalam *database* melalui aplikasi dan kemudian akan divisualisasikan ke dalam diagram Pearce dkk. (1984) dalam bentuk plot dan kontur. Visualisasi data ini kemudian dievaluasi keefektifannya saat digunakan untuk analisis tatanan tektonik pada diagram.



Gambar 2. Alur kerja aplikasi web visualisasi data elemen jejak ke dalam diagram Pearce dkk. (1984).

Tabel 3. Sumber data elemen jejak yang digunakan dalam penelitian.

Lokasi	Penulis	<i>Tectonic Setting</i>	Jumlah Data	Diagram
White Creek Batholith, Amerika Utara	Brandon dkk. (1994)	<i>Arc-Continent Collision</i>	27	Rb-(Y+Nb)
Sabuk Barat Granit Thailand	Uchida dkk. (2024)	<i>Syn-Collision</i>	15	Rb-(Yb+Ta)
Stok Granitik Notch Peak, Amerika Serikat	Nabelek dkk. (1986)	<i>Continental Arc</i>	53	Rb-(Yb+Ta)
Panafrica Stratoid Granite, Madagaskar	Nedelec dkk. (1995)	<i>Post-Collision</i>	38	Rb-(Y+Nb)
Batholit Baoji, China	Gong dkk. (2024)	<i>Post-Collision</i>	12	Rb-(Y+Nb)
Plutonic Cordillera de Talamanca, Panama-Costarica	Drummond dkk. (1995)	<i>Transitional Arc</i>	52	Rb-(Y+Nb)

HASIL DAN DISKUSI

Penggunaan Aplikasi

Pengguna (*user*) aplikasi ini dapat melakukan *input* data geokimia ke dalam *database* melalui dua cara yaitu dengan melakukan input secara manual melalui *form input* pada halaman *input* aplikasi, atau dengan mengunggah *file* data dalam format *csv* melalui aplikasi. *User* dapat mengakses dan menghapus data-data pada *database* pada halaman *input*. Data yang sudah

dimasukkan ke dalam *database* dapat ditampilkan ke dalam diagram Pearce dkk. (1984) dalam bentuk plot pada halaman *chart* (Gambar 3). *User* dapat memilih data mana saja yang ingin ditampilkan dengan menandai kotak centang (*checkbox*) pada panel data sampel dan data akan tampil diplot dalam diagram. Untuk membedakan dan mengelompokkan titik-titik plot *user* dapat mengganti warna masing-masing titik menggunakan kotak *input* warna pada panel data sampel.

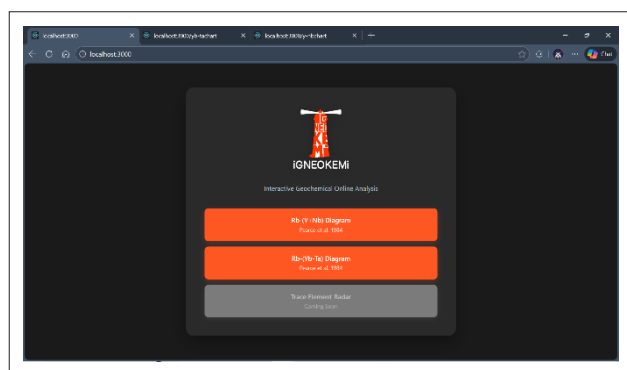
Tabel 4. Koordinat garis batas diskriminasi diagram Pearce dkk. (1984).

Batas Tatanan Tektonik	Koordinat			
	X1	Y1	X2	Y2
Diagram Rb – (Y+Nb)				
COLG/VAG	2	80	55	300
COLG/WPG	55	300	400	2000
VAG/WPG	55	300	51.5	8
VAG/ORG	51.5	8	50	1
ORG/WPG	51.5	8	2000	400
Diagram Rb – (Yb+Ta)				
COLG/VAG	0.5	140	6	200
COLG/WPG	6	200	50	2000
VAG/WPG	6	200	6	8
VAG/ORG	6	8	6	1
ORG/WPG	6	8	200	400

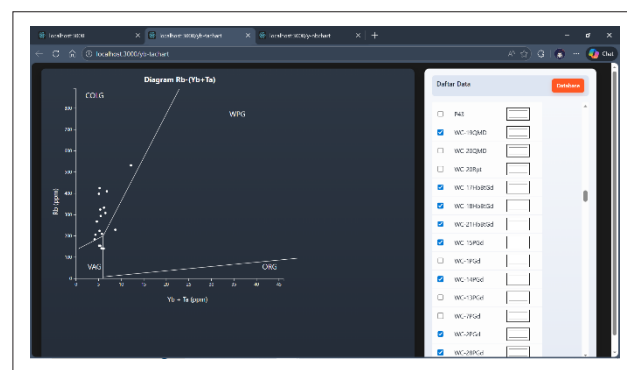
Data pada aplikasi web dapat dikelompokkan ke dalam grup-grup dengan menandai kotak centang pada panel data sampel yang akan dikelompokkan dan memilih tombol grup. *User* dapat mengisi data

nama grup dan deskripsi grup pada halaman modal grup. Data grup yang dimasukkan akan disimpan ke dalam *database* oleh aplikasi. Data grup sampel ini kemudian dapat digunakan oleh aplikasi untuk menampilkan kelompok titik-titik plot pada diagram dalam bentuk *density plot/density contour*. *Density plot* dapat ditampilkan saling bertimpa dengan titik-titik plot yang dipilih untuk memvisualisasikan korelasi antara data yang diplot dan grup data (Gambar 4).

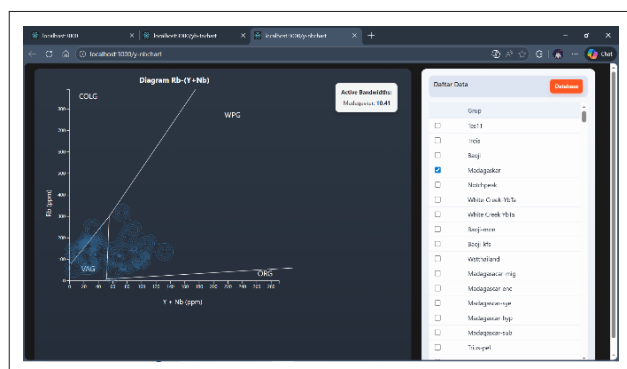
Density plot pada D3.js adalah visualisasi densitas data titik-titik plot dalam bentuk geometri berupa garis-garis kontur atau grup kontur. Densitas data dihasilkan dari perhitungan (*computing*) titik-titik koordinat plot secara *default* menggunakan fungsi *contourDensity()* dari *library* D3.js. Setiap geometri mempresentasikan jumlah titik plot per pixel persegi, sehingga semakin banyak jumlah titik-titik plot pada satu area, maka garis kontur yang mengelilingi area tersebut akan semakin banyak. Garis-garis kontur yang dihasilkan membentuk puncak kontur yang merupakan area yang memiliki densitas titik-titik plot terbesar.



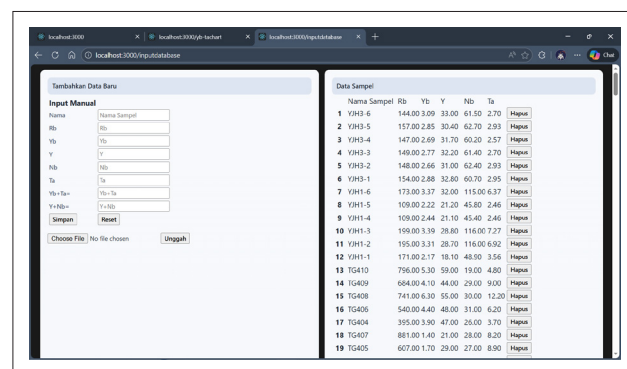
A



B



C



D

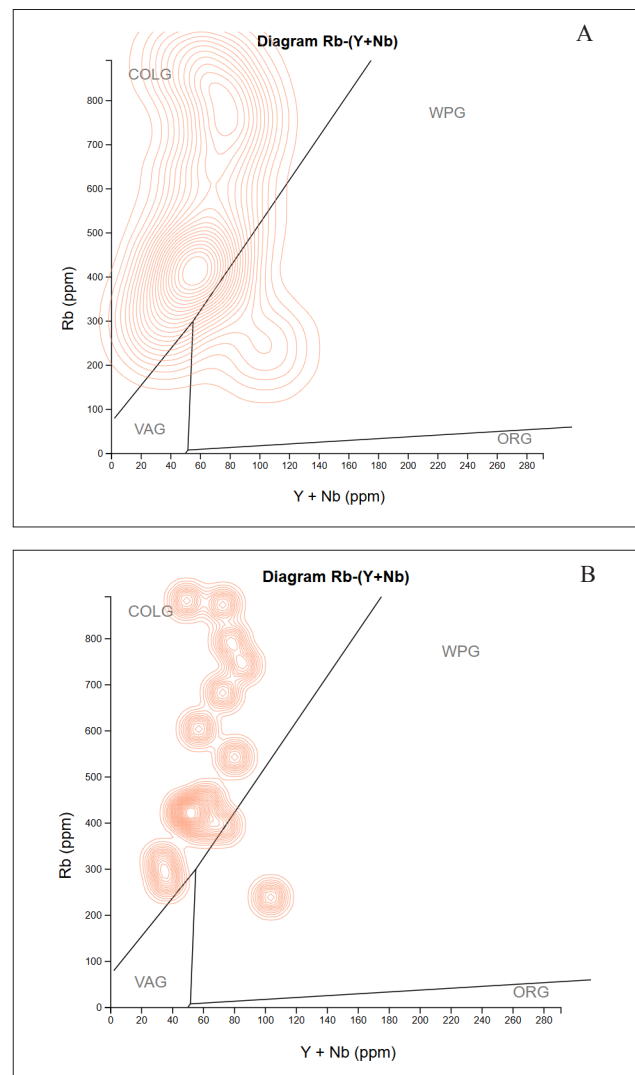
Gambar 3. Tangkapan gambar aplikasi pada web browser. A: Halaman utama aplikasi web, B: Halaman diagram diskriminasi Rb-(Yb+Ta) yang menunjukkan titik-titik plot data, C: halaman diagram diskriminasi Rb-(Y+Nb) yang menunjukkan *density plot* berupa kontur, dan D: Halaman pengaturan *database* data geokimia.

Pengguna dapat menggabungkan beberapa grup kontur dalam satu diagram di mana grup kontur yang ditampilkan terakhir akan berada di atas grup kontur yang ditampilkan sebelumnya. Masing-masing grup kontur memiliki warna yang berbeda yang telah diatur secara otomatis oleh aplikasi sehingga dapat lebih mudah untuk membedakan masing-masing grup. Pengguna juga dapat menggabungkan grup kontur dengan titik-titik plot di mana titik plot selalu berada di atas grup kontur yang bertujuan agar tidak titik-titik plot yang tertutup oleh garis kontur. Pengguna dapat secara interaktif mengatur data grup kontur dan plot mana saja yang ingin ditampilkan dengan mengatur kolom centang yang ada pada panel data dan grup sampel.

Penentuan *Bandwidth*

Bentuk dari garis kontur yang dihasilkan aplikasi ini bergantung kepada kerapatan data-data yang dimasukkan. Semakin jauh jarak antara suatu titik data pada diagram diskriminasi *scatter plot*, maka area kontur akan semakin luas. Pada beberapa data dengan sebaran titik-titik yang jauh satu sama lain dapat terbentuk beberapa area kontur (Gambar 4). Kemunculan beberapa area kontur ini dipengaruhi oleh pengaturan *bandwidth* pada fungsi JavaScript yang digunakan untuk membuat visualisasi kontur, yaitu fungsi `d3.contourDensity().bandwidth(x)` di mana *x*: nilai *bandwidth* yang dimasukkan. Semakin kecil nilai *bandwidth* semakin tajam dan detail kontur yang dihasilkan serta jumlah area kontur terpisah yang akan muncul juga akan semakin banyak, dan sebaliknya semakin besar nilai *bandwidth* maka kontur yang dihasilkan akan semakin halus dan area kontur terpisah juga akan semakin sedikit (Gambar 4)

Munculnya area kontur yang terpisah menunjukkan data pada area tersebut memiliki jarak yang jauh dengan sebagian besar data yang diplot ke dalam diagram diskriminasi. Hal ini dapat digunakan untuk menentukan adanya *outlier* dari data geokimia yang digunakan dengan menjadikan data yang berada pada area kontur yang terpisah menjadi indikasi adanya *outlier*. Oleh karena itu, penentuan nilai *bandwidth* yang digunakan menjadi penting, dan untuk menentukan *bandwidth* yang digunakan pada aplikasi ini digunakan metode *Maximum Likelihood Cross-Validation (MLCV)* menggunakan algoritma yang dituliskan menggunakan Python yang dapat dikoneksikan dengan aplikasi berbasis web Node.js ini.



Gambar 4. Penggunaan nilai *bandwidth* kontur yang berbeda pada diagram diskriminasi Rb-(Y+Nb) dengan menggunakan data elemen jejak granitik dari *Western Granitoid Belt of Thailand*. A: Kontur dengan *bandwidth* 20px, dan B: Kontur dengan *bandwidth* 10px.

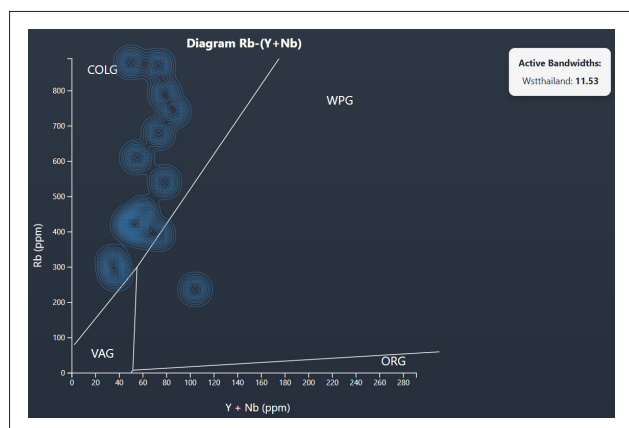
Sebelum menentukan nilai *bandwidth* menggunakan metode MLCV, aplikasi web ini terlebih dahulu mempersiapkan data yang diawali dengan menormalisasikan data dengan metode *Median Absolute Deviation (MAD)*, yaitu menggunakan nilai tengah data yang bertujuan agar dimensi nilai Rb dan Y+NB atau Rb dan Yb+Ta menjadi sebanding. Kemudian aplikasi web akan menyisihkan data-data *outlier* yang memiliki nilai 3 kali nilai median. Setelah menyiapkan data aplikasi kemudian memproses MLCV dengan menguji setiap kemungkinan nilai *bandwidth* dan menentukan *Log-likelihood* dari setiap uji. Dengan metode ini *bandwidth* kontur dapat ditentukan secara otomatis berdasarkan perhitungan komputer dengan telah mempertimbangkan sebaran

data menggunakan penerapan metode MLCV dengan rumus:

$$L(h) = \sum_{i=1}^n \log \hat{f} - i(\tilde{x}_i; h) \quad \dots\dots\dots(1)$$

$L(h)$ adalah *Log-likelihood* untuk setiap nilai h , adalah estimasi densitas tanpa nilai i , dan h adalah nilai *bandwidth* yang diuji.

Nilai *bandwidth* yang didapatkan dari metode MLCV kemudian diskala ulang dalam rentang nilai 10px – 20px untuk mendapatkan visualisasi grafik kontur yang dapat diamati dengan baik di dalam diagram diskriminasi. Hal ini dikarenakan adanya hasil perhitungan *bandwidth* MLCV yang terlalu kecil atau terlalu besar sehingga tidak representatif untuk ditampilkan dalam skala diagram diskriminasi yang ada pada aplikasi web ini. Dengan menggunakan logika ini, *contour density* yang dihasilkan oleh data-data elemen jejak yang digunakan pada aplikasi ini akan memiliki *bandwidth* masing-masing yang nilainya dipengaruhi oleh sebaran data (Gambar 5). Sehingga, penentuan *outlier* dapat dilakukan berdasarkan keterikatan kontur pada suatu data.



Gambar 5. Hasil visualisasi *contour density* data elemen jejak granitik dari *Western Granitoid Belt of Thailand* setelah menggunakan metode MLCV untuk penentuan *bandwidth*.

Hasil Visualisasi Data

Data elemen jejak dari dua lokasi digunakan untuk menampilkan titik-titik plot yaitu: 1) Data dari Batholit White Creek di Selatan Canadian Cordillera pada diagram $Rb - (Y+Nb)$, dan 2) data dari granitik di Sabuk Granitoid Barat Thailand pada diagram $Rb - (Yb+Ta)$. Batholit White Creek merupakan batuan beku felsik yang berasal dari zona tabrakan dan akresi

antara busur kepulauan (*arc*) dan kontinen (Foster dkk., 1997). Pada diagram $Rb - (Y+Nb)$ (Gambar 6A) titik-titik plot elemen jejak batuan ini semuanya berada pada area *Within Plate Granite (WPG)* dan *Collision Granite (COLG)* kecuali dua titik plot sampel yang muncul pada area *Volcanic Arc Granite (VAG)* yang merupakan aplit yang sangat *peraluminous* (Brandon dkk., 1994). Tampilan grup kontur data sampel ini menunjukkan densitas data terbesar berada pada area WPG (Gambar 6B). Terdapat dua area kontur terpisah yang dapat menjadi indikasi adanya *outlier* namun penentuan *outlier* haruslah dilakukan dengan mempertimbangkan adanya *magma mixing* atau pengaruh dari fraksinasi kristalisasi yang mungkin terjadi pada sumber magma.

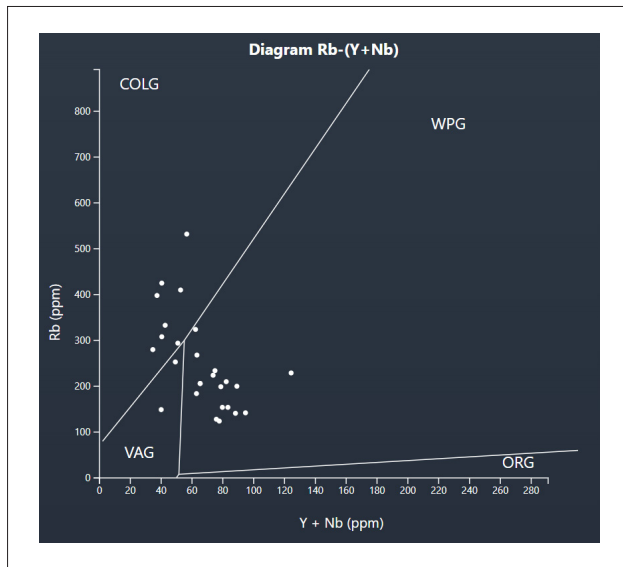
Pada diagram $Rb - (Y+Ta)$ (Gambar 7A) yang menunjukkan data elemen jejak dari Sabuk Granitoid Barat Thailand, titik-titik plot terlihat menyebar di sepanjang garis batas diskriminasi COLG/WPG dengan hampir seluruh titik berada pada sisi COLG kecuali satu sampel yang memiliki nilai Rb yang lebih rendah. Sementara itu *contour density* (Gambar 7B) menunjukkan densitas data paling besar berada pada nilai Rb antara 395-452 ppm pada area COLG dan terdapat satu area kontur terpisah yang berada pada area WPG yang dapat menjadi indikasi kuat data tersebut merupakan *outlier*.

Ketika menampilkan dua atau lebih data elemen jejak yang berbeda dalam bentuk titik-titik plot. Pengguna aplikasi web ini dapat menggunakan *input* warna untuk membedakan warna masing-masing data. Menggunakan data elemen jejak dari Notch Peak *Granitic Stock*, Utah, Amerika Serikat, pada diagram $Rb - (Yb+Ta)$ ditampilkan tiga kelompok/grup data yaitu: 1) Granit Notch Peak, 2) Monzonit Kuarsa Notch Peak 1, dan 3) Monzonit Kuarsa Notch Peak 2 dalam bentuk titik plot (Gambar 8A). Hasil visualisasi menunjukkan posisi titik-titik plot ketiga data saling berdekatan dan beberapa titik plot menimpa titik yang lain.

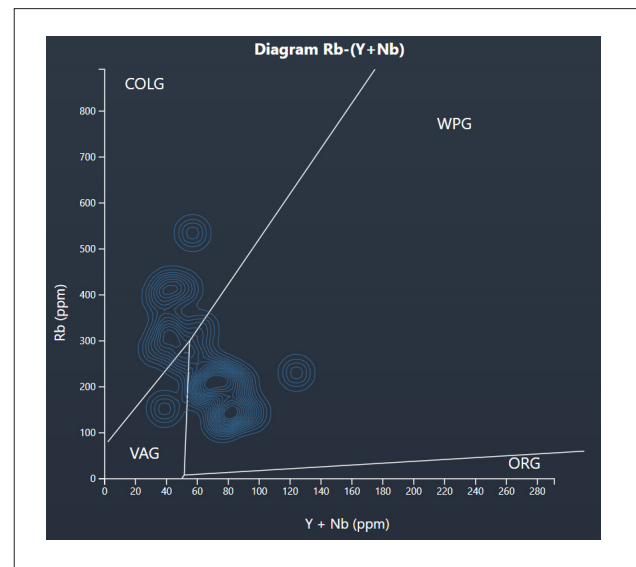
Dengan menggunakan *contour density*, data elemen jejak Granit Notch Peak dapat ditampilkan dalam bentuk kontur dan Monzonit Kuarsa Notch Peak 1 dalam bentuk titik-titik plot (Gambar 8B). Hasil visualisasi menunjukkan Monzonit kuarsa Notch Peak 1 berada pada bagian bawah dari area kontur Granit Notch Peak. Hal ini dapat berarti pengaruh sumber kontinental pada Granit Notch Peak lebih besar

dibandingkan dengan Monzonit Kuarsa dengan nilai Rb yang relatif lebih besar, dan menunjukkan Granit

Notch Peak terbentuk pada bagian atas dari diapir Notch Peak (Nabelek dkk., 1986).

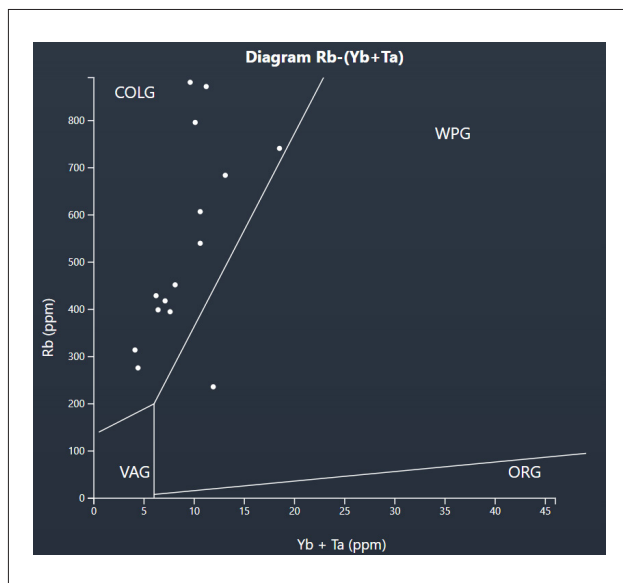


A

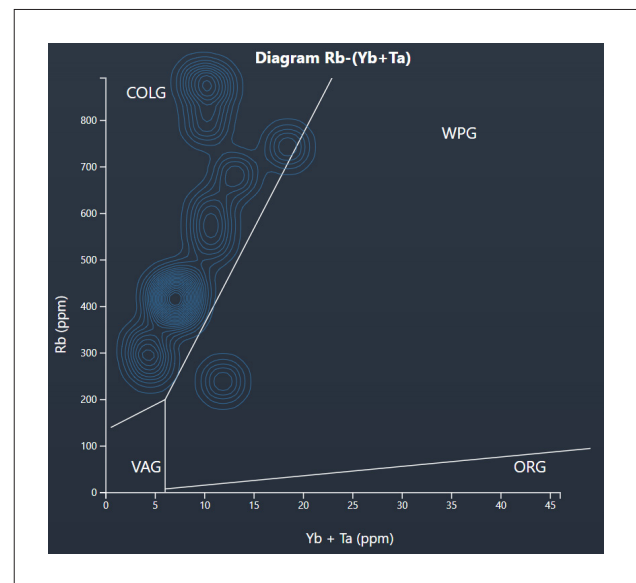


B

Gambar 6. Hasil visualisasi data elemen jejak Batholith White Creek pada diagram Rb-(Y+Nb). A) Visualisasi dalam bentuk titik-titik plot, dan B) Visualisasi dalam bentuk *density plot* / *contour density*. ORG: *Ocean Ridge Granite*, VAG: *Volcanic Arc Granite*, WPG: *Within Plate Granite*, dan COLG: *Collision Granite*.



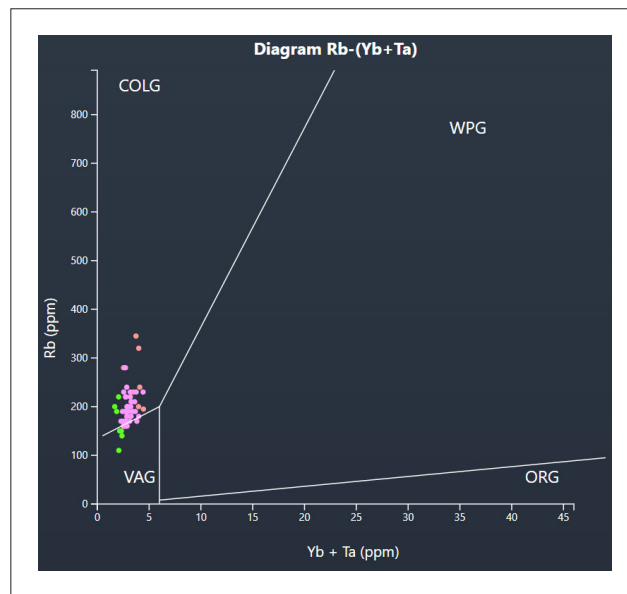
A



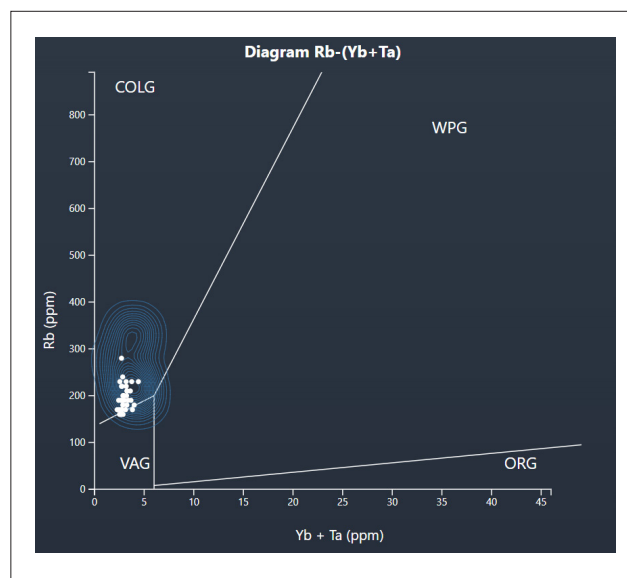
B

Gambar 7. Hasil visualisasi data elemen jejak Sabuk Granitoid Barat Thailand pada diagram Rb-(Yb+Ta). A) Visualisasi dalam bentuk titik-titik plot, dan B) Visualisasi dalam bentuk *density plot* / *contour density*. ORG: *Ocean Ridge Granite*, VAG: *Volcanic Arc Granite*, WPG: *Within Plate Granite*, dan COLG: *Collision Granite*.

Ketika menampilkan dua atau lebih data elemen:



A



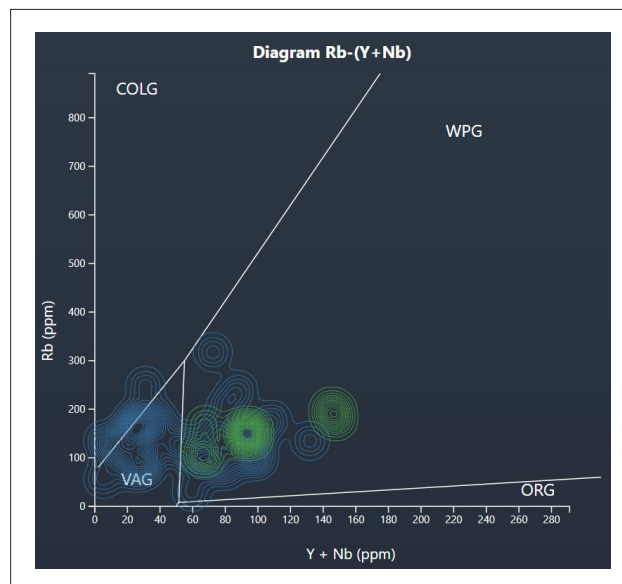
B

Gambar 8. Hasil visualisasi data elemen jejak Notch Peak Granitic Stock. A) Visualisasi berupa titik-titik plot: Merah Muda: Notch Peak Granite, Ungu: Notch Peak Quartz Monzonite 1, dan Hijau: Notch Peak Quartz Monzonite 2. B) Visualisasi kombinasi titik plot dan *density plot*: Kontur Biru: Notch Peak Granite dan Plot Putih: Notch Peak Quartz Monzonite. ORG: *Ocean Ridge Granite*, VAG: *Volcanic Arc Granite*, WPG: *Within Plate Granite*, dan COLG: *Collision Granite*.

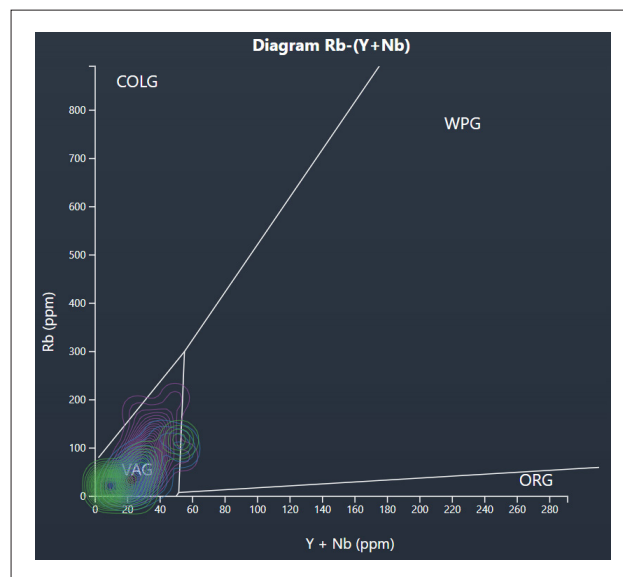
Diagram pada aplikasi ini juga dapat menampilkan beberapa grup kontur sekaligus untuk komparasi sebaran data. Pada diagram Rb-(Y+Nb) ditampilkan data dari granit Panafrican Stratoid dari Madagaskar dan granit tipe-A dari Baoji, Cina. Kedua batuan granitik tersebut diketahui terbentuk pada tatanan *post-colissional* (Nedelec dkk., 1995; Gong dkk., 2024). Tampilan *contour density* dari Granit Madagascar menunjukkan sebaran data mulai dari area VAG sampai WPG. Munculnya data pada area VAG menunjukkan terdapat adanya sumber magma yang merupakan warisan dari tatanan busur kepulauan (*arc*) yang kurang matang atau tingkat fraksinasi magma yang kecil (Foster dkk., 1997), sedangkan Granit Baoji tersebar hanya di area WPG (Gambar 9). Kedua data menunjukkan arah sebaran yang sama, namun Granit Baoji berada pada area WPG. Hal ini dapat menunjukkan bahwa Granit Baoji berasal dari sumber yang lebih matang yaitu hasil dari *mixing* antara magma monzodiorit dan batuan felsik dari lelehan parsial material kontinen purba (Gong dkk., 2024).

Pada setiap kontur grup yang ditampilkan pada aplikasi terdapat satu atau lebih puncak kontur yang ditandai dengan ruang kosong di tengah kontur. Puncak kontur tersebut menunjukkan pusat densitas

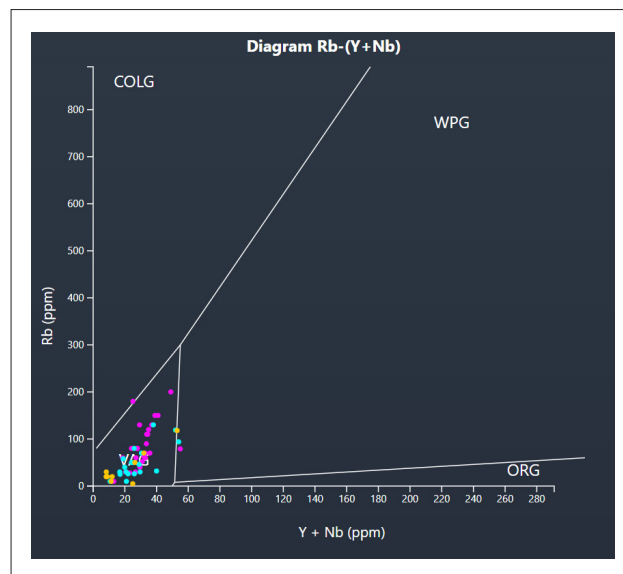
data, di mana data grup kontur yang memiliki satu puncak menunjukkan sebaran data yang terpusat pada satu area sedangkan grup kontur yang memiliki beberapa puncak menunjukkan data tersebar kepada beberapa area. Posisi puncak kontur dapat digunakan untuk membandingkan posisi sebaran dua data elemen jejak atau lebih pada diagram Pearce dkk. (1984). Data elemen jejak dari batuan plutonik dan vulkanik dari sabuk pegunungan Cordillera de Talamanca di Costarica – Panama, terbagi menjadi tiga kelompok yaitu: 1) Talamanca Intrusive Suite, 2) Batuan vulkanik dan *hypabisal* Talamanca dan, 3) Grup gabro thoelitik dan pluton El Baru. Pada diagram Rb-(Y+Nb) (Gambar 10A) ketiga data grup kontur muncul saling bertimpaan, namun puncak dari *contour density* Talamanca Intrusive Suite berada pada bagian atas area VAG sedangkan Grup Gabro Thoelitik dan Pluton El Baru berada paling bawah. Ini dapat menunjukkan karakteristik batuan Gabro Thoelitik yang terbentuk pada komplek ofiolit Nicoya yang memiliki sumber magma mantel sedangkan Talamanca Intrusive memiliki karakteristik batuan granitik Volcanic *Arc* yang terbentuk pada sabuk kepulauan dengan kematangan sedang (Drummon dkk., 1995). Hal ini lebih sulit terlihat jika memvisualisasikan data elemen jejak Cordillera de Talamanca pada diagram dengan titik-titik plot (Gambar 10B).



Gambar 9. Visualisasi *density plot* dari data Panafrican Stratoid Granite Madagaskar (Biru) dan Granit Baoji (Hijau).
 . ORG: Ocean Ridge Granite, VAG: Volcanic Arc Granite, WPG: Within Plate Granite, dan COLG: Collision Granite.



A



B

Gambar 10. Visualisasi data elemen jejak batuan beku Cordillera de Talamanca. A) Visualisasi dalam bentuk titik plot, Talamanca Intrusive Suite (Ungu), Batuan vulkanik dan hipabisal Talamanca (Cyan), dan Grup gabro thoelitik dan pluton El Baru (Kuning). . ORG: *Ocean Ridge Granite*, VAG: *Volcanic Arc Granite*, WPG: *Within Plate Granite*, dan COLG: *Collision Granite*.

KESIMPULAN

Analisis tatanan tektonik menggunakan data-data geokimia merupakan suatu pekerjaan yang membutuhkan keleluasaan seorang ahli geokimia dalam menginterpretasikan data. Diagram diskriminasi tektonik statis yang dihasilkan oleh perangkat-perangkat lunak yang saat ini tersedia dapat membatasi ruang interpretasi peneliti. Penggunaan aplikasi yang dibangun dengan basis Node.js, Express.js, MySql dan D3.js dengan penerapan komputasi data menggunakan python dapat memberikan visualisasi data dalam diagram plot yang lebih dinamis dan interaktif.

D3.js dapat digunakan untuk membuat visualisasi data dalam diagram diskriminasi tektonik menggunakan *contour density* yang akan menghasilkan area kontur berdasarkan sebaran dan kerapatan data geokimia yang digunakan, selain menggunakan titik-titik plot yang telah umum digunakan. Interpretasi data geokimia pada diagram diskriminasi Rb-(Y+Nb) dan Rb-(Yb+Ta) dapat memperlihatkan sebaran data dengan lebih jelas dan telah mempertimbangkan pengaruh dari titik data yang telah diketahui terhadap area sekitarnya yang belum diketahui sehingga dapat memberikan gambaran kecenderungan sebaran data pada diagram. Bentuk visualisasi kontur yang utuh (menggambarkan gabungan data) juga dapat memberikan gambaran arah sebaran data yang lebih baik. Kerapatan kontur dan titik puncak kontur juga memberikan gambaran posisi dominan data yang lebih jelas sehingga dapat membantu ahli geokimia menentukan tatanan tektonik sampel yang tersebar lebih dari satu area tatanan tektonik pada diagram diskriminasi.

Penggunaan *contour density* juga membantu saat menggunakan data geokimia dengan jumlah yang

sangat banyak yang akan menghasilkan titik-titik plot yang saling berhimpit dengan *scatter plot*. Titik-titik plot yang saling berhimpit akan menyulitkan interpretasi, terutama jika peneliti ingin memperhatikan korelasi antar data. Dengan visualisasi dalam bentuk kontur, data yang sangat banyak akan ditampilkan dengan lebih baik. Selain itu, dengan menggunakan warna yang berbeda untuk titik-titik plot tertentu, peneliti dapat menganalisis korelasi antar data dengan memperhatikan perbedaan warna.

Aplikasi berbasis web Node.js juga memungkinkan pengaplikasian algoritma perhitungan statistik menggunakan Python yang digunakan untuk penentuan *bandwidth* secara otomatis berdasarkan perhitungan statistik dan sebaran data yang digunakan. Sehingga, sebaran area kontur yang dihasilkan dapat digunakan sebagai alat bantu untuk menentukan *outlier* data. Di samping itu, dengan terhubungnya aplikasi ini dengan *database* yang dapat diakses secara *online*, memungkinkan aplikasi digunakan untuk menjadi bank data geokimia jika nanti dikembangkan untuk dapat digunakan bersamaan oleh banyak pengguna secara *online*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pegawai Balai Pendidikan dan Pelatihan Tambang Bawah Tanah, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral atas masukan dan motivasi yang diberikan kepada penulis untuk menyelesaikan penyusunan tulisan ini dan juga kepada semua penulis dan organisasi yang telah menyediakan data dan acuan gratis untuk penelitian ini yang dapat diakses secara *online*.

REFERENSI

- Bostock M. dan Observable Incoorporation, 2024. Density Estimation. 1h. 0.111MB. <https://d3js.org/d3-contour/density>
- Bostock M. dan Observable Incoorporation, 2024. What is D3?. 1h. 0.164MB. <https://d3js.org/what-is-d3>
- Brandon A. D. dan Lambert R. S., 1994. Crustal Melting in Cordilleran Interior: The Mid-Cretaceous White Creek Batholith in Southern Canadian Cordillera. *Journal of Petrology*, v35, p1: 239-269.
- Drummond M. S., Bordelon M., De Boer J. Z., Defant M. J., Bellon H. dan Feigenson M. D., 1995. Igenous Petrogenesis And Tectonic Settinh of Plutonic and Volcanic Rocks of The Cordillera De Tamanca,

Costarica-Panama, Central American Arc. *American Journal of Science*, v 295: 875-919.

Foster H.-J., Tischendorf G. dan Trumbull R.B., 1997. An Evaluation of the Rb vs. (Y+Nb) Discrimination Diagram to Infer Tectonic Setting of Silicic Igneous Rocks. *Lithos*, v40: 261-293.

Gong X., Abuduzun N., Jia X., Cheng Y., Cai H., Wu X dan Yang H., 2024. Early Jurassic A-Type Granite and Monzodiorite from the Baoji Batholith Transition from Post-Collision to Post-Orogenic Extension in the Qinling Orogenic Belt, China. *Frontiers in Earth Science*, v12: 1-20.

Janousek V., Moyen J., Erban V., Farrow C. Geochemical Data Toolkit (GCDkit): a Key for Magmatic Geochemists to the Treasury of Data Analysis, Statistics and Graphics in R. *GeoLines* v 16, p 25-26.

Lu Y. 2004. GeoKit-A geochemical toolkit for Microsoft Excel. *Geochimica*, v33, No. 5, p459-464

Mozilla Corporation, 2024. Mdn Web Docs: JavaScript. 1h, 0.176MB; <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/JavaScript>

Nabelek P. I., Papike J. J. dan Laul J. C., 1986. The Notch Peak Granitic Stock, Utah: Origin of Reverse Zoning and Petrogenesis. *Journal of Petrology*, V27, p5, 1035-1069.

Nedelec A., Stephens W. E. dan Fallick A. E., 1995. The Panafrican Stratoid Granites of Madagascar: Alkaline Magmatism in a Post-Collisional Extensional Setting. *Journal of Petrology*, v36, no. 5: 1367-1391.

OpenJS Fondation, 2024. About Node.js®. 1h, 0.111MB. <https://nodejs.org/en/about>.

Oracle Corporation, 2024. MySQL™ Documentation: MySQL 8.4 Reference Manual. 1.2.1 What is MySQL?. 0.077MB. <https://dev.mysql.com/doc/refman/8.4/en/what-is-mysql.html>

Pearce J.A., Harris N.B.W. and Tindle A.G., 1984. Trace Element Discrimination Diagrams for the Tectonic Interpretation of Granitic Rocks. *Journal of Petrology*, v25, p4: 956-938.

Petrelli M., Poli G., Perugini D., Peccerillo A. 2005. PetroGraph: A new software to visualize, model, and present geochemical data in igneous petrology. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v 6(7), p 1-15.

Pitcher, W. P., 1997. *The Nature and Origin of Granite Second Edition*. Springer-Science+Business-Media, B.V. Hong Kong: 29h.

Qiu J., Song w., Jiang C., Wu H., Dong R. 2013. CGDK: An extensible CorelDRAW VBA program for geological drafting. *Computers & Geosciences*, v 51, p 34 -48

Su Y., Langmuir C. H., Asimow P. 2003. PetroPlot: A plotting and data management tool set for Microsoft Excel: PETROPLOT. *Geochemistry Geophysics Geosystems*, v 4(3).

Uchida E., Yokokura T., Niki S. dan Hirata T., 2024. Geochemical Characteristics and U-Pb Dating of Granites in the Western Granitoid Belt of Thailand. *Geosciences* 2024, v14, no.135: 1-18.

Wang X., Ma W., Gao S., Ke L. 2008. GCDPlot: An extensible microsoft excel VBA program for geochemical discrimination diagrams. *Computer & Geoscience* V34(12), p 1964-1969.

Yu Q.-Y., Bagas L., Yang P.-H., Zhang D., 2018. GeoPyTool: A Cross-platform Software Solution for Common Geological calculation and plots. *Geoscience Frontiers* vxxx: 1-11.

Zhou J., Li X. 2006. GeoPlot: An Excel VBA program for geochemical data plotting. *Computers & Geosciences*, V32(4), p 554-560
